

論文 高炉スラグ細骨材を用いた軌道スラブの耐久性に関する検討

河金 甲^{*1}・佐々木 満範^{*2}・増田 竜也^{*2}・豊田 哲哉^{*3}

要旨：天然骨材の保全や産業副産物の有効活用のため、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの軌道スラブへの適用性を、実際の軌道スラブの製作工程を模擬して蒸気養生を行った供試体を製作し、耐久性の観点から検討した。その結果、天然細骨材の 50%を高炉スラグ細骨材に置換した場合、高い中性化抵抗性と凍結融解抵抗性を有していることや ASR 抑制効果と塩化物イオン浸透抵抗性は天然骨材のみを用いた場合と比較して向上することを確認した。さらに、高炉スラグ微粉末との併用効果を検討した結果、高炉スラグ微粉末を併用することにより ASR 抑制効果や塩化物イオン浸透抵抗性は顕著に向上した。

キーワード：高炉スラグ細骨材、軌道スラブ、蒸気養生、高炉スラグ微粉末、耐久性

1. はじめに

新規に建設される新幹線の軌道構造には、路盤上にプレキャストコンクリート製のスラブ版（以下、軌道スラブ）を設置し、その上にレールを敷くスラブ軌道が採用されている（写真－1）。軌道スラブの構造には RC 構造と PRC 構造があり、一般に寒冷地では PRC 構造が用いられる。これは、コンクリートにプレストレスを与えてひび割れを抑制することにより、雨水の侵入を防いで凍結融解等による劣化を防止するためである。

一方、軌道スラブ製作には大量のコンクリートが必要となる。近年、良質な天然骨材の入手が困難になりつつある中、産業副産物である高炉スラグ細骨材（以下、BFS）をコンクリート用細骨材として活用する取り組みが活発に行われている¹⁾²⁾。天然骨材の代替品として BFS をコンクリートに混合することにより、資源の有効活用だけではなくプレキャスト製品の高耐久化が可能なことが明らかになっており²⁾、BFS を用いた PC 製品への実用化も検討されている³⁾。

BFS を用いて劣化抵抗性が向上するのは、BFS とセメントペースト間で生じる水和反応により細骨材周辺の脆弱部が改善されるためであり、コンクリートの耐久性はセメントの種類、蒸気養生の有無、蒸気養生後の水中養生期間等さまざまな影響を受ける²⁾。PRC 構造の軌道スラブ製作時、早強ポルトランドセメント（以下、早強セメント）を用い、蒸気養生を行って材齢 18 時間程度でプレストレスを導入した後、3 日以上水中養生または散水養生を実施するのが一般的である。しかしながら、BFS を用いたコンクリートにおいて、早強セメントの使用や蒸気養生は、他のセメントを用いた場合や蒸気養生を行わない場合と比較して耐久性が低下する傾向があり、所定の耐久性を確保するためには蒸気養生後の十分な水中

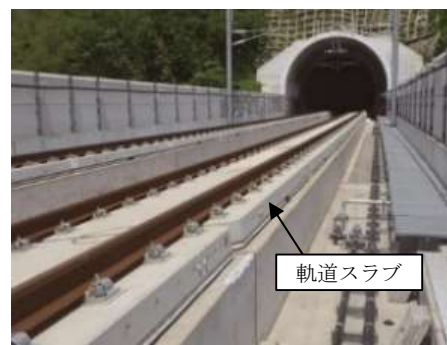
養生が必須であることが指摘されている^{4)~6)}。そのため、BFS を用いたコンクリートを軌道スラブに適用するにあたり、BFS の使用および養生方法がコンクリートの品質に与える影響を把握しておく必要がある。

骨材資源の枯渇が懸念される中、天然骨材の保全や産業副産物の有効活用のため、本研究では、BFS を用いたコンクリートの軌道スラブへの適用性を、実際の軌道スラブの製作工程を模擬した供試体を製作し、耐久性の観点から検討した。

2. 検討概要

2.1 コンクリートの配合

BFS はガラス質であることから天然骨材に比べて保水性が低く、置換率を増加させるとブリーディングが増える傾向にあることから、BFS の置換率は天然骨材のみを用いた場合と同様の施工性確保が可能な 20~60%が多く用いられてきた⁷⁾。また、水結合材比（W/B）が 45%の高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートにおいて、BFS の置換率が 50%を超えるとワーカビリティが悪くなることやブリーディングが増加することが報告されている⁸⁾。BFS を 100%置換しても増粘剤の使用等により高



写真－1 軌道スラブ

*1 極東興和（株） 営業本部技術企画部 博(工)（正会員）

*2 （独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社

*3 極東興和（株） 東京支店技術部

表－1 コンクリートの配合

配合名		W/B (%)	細骨材 置換率 (%)	混和材 置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							混和剤			
						W	HC	MC	GGBS	S	BFS	G※	AD		AE	
													(kg/m ³)	(B※%)	(kg/m ³)	(B※%)
基準(早強単味)	H37-0	37	0	0	41.0	147	397	0	0	741	0	1073	2.38	0.600 %	0.0199	0.005 %
塩害(中庸熱単味)	M28-0	28	0	0	37.6	147	0	525	0	643	0	1073	2.89	0.550 %	0.0420	0.008 %
S30%置換	H37-30	37	30	0	41.0	147	397	0	0	519	233	1073	2.08	0.525 %	0.0159	0.004 %
S50%置換	H37-50	37	50	0	41.0	147	397	0	0	370	389	1073	1.99	0.500 %	0.0119	0.003 %
S30%-B50%置換	B34-30	34	30	50	39.6	147	216	0	216	488	219	1073	1.73	0.400 %	0.0216	0.005 %
S50%-B50%置換	B34-50	34	50	50	39.6	147	216	0	216	349	366	1073	1.73	0.400 %	0.0173	0.004 %

W:水道水, HC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm³), MC: 中庸熱ポルトランドセメント(密度=3.21g/cm³), GGBS: 高炉スラグ微粉末6000(密度=2.91g/cm³), S: 細骨材(川砂, 表乾密度=2.63 g/cm³), BFS: 高炉スラグ細骨材(BFS5, 表乾密度=2.76 g/cm³), G: 粗骨材(川砂利, 表乾密度=2.65 g/cm³, 最大寸法:20mm), AD: 高性能減水剤, AE: AE剤

※)ASR試験に用いた配合は, 粗骨材の50%を反応性骨材(安山岩, 表乾密度=2.79 g/cm³, 最大寸法15mm)で置換

表－2 検討項目および試験方法

検討項目	養生方法	試験方法	供試体 寸法	供試 体数
材料分離 抵抗性	-	「スランブ試験後の平板叩きによるコンクリート簡易変形試験方法 ¹⁾ 」を参考にして, スランブ試験後にスランブ試験用の平板を叩いて試料の直径が550mmになるまで変形させ, コンクリートの材料分離抵抗性を確認。	-	-
圧縮強度 (JIS A 1108)	蒸気養生+3日間水中養生(その後は20℃環境にて保管)	材齢1日(18時間, M28-0は22時間), 28日, 182日の圧縮強度を測定。	φ100× 200mm	各3体
中性化 抵抗性 (JIS A 1153)	蒸気養生+3日間水中養生(その後は20℃環境にて保管)	材齢56日後に促進中性化試験開始(二酸化炭素濃度5%, 型枠に接していた側面の2面を試験面)。促進期間1週, 4週, 8週, 13週, 26週で供試体を端部から60mmずつ割裂し, 割裂面にフェノールフタレイン試薬を噴霧して中性化深さを測定。	100× 100× 400mm	各3体
凍結融解 抵抗性 (JIS A 1148)	蒸気養生+3日間水中養生(その後は20℃環境にて保管)	材齢28日後に24時間水中養生を行ってから水中凍結融解試験方法(A法)に従って試験開始。凍結融解30サイクル間隔で300サイクルまで相対動弾性係数を測定。	100× 100× 400mm	各3体
ASR抑制効果 (コンクリート バー法, JCI-S- 010)	蒸気養生のみ※	蒸気養生終了後, 基長測定時の供試体温度を測定環境に合わせるため20℃の恒温室に24時間静置し, 脱枠して基長測定。その後, 水道水を含ませた保水紙で供試体を覆い, ラップフィルムとプラスチック製袋で密封し, 温度40℃の貯蔵容器内で貯蔵。材齢12か月までの長さ変化を測定。	100× 100× 400mm	各3体
塩化物イオン 浸透抵抗性 (JSCE-G 572)	蒸気養生+3日間水中養生(その後は20℃環境にて保管)	材齢21日後にφ100×200mmの供試体両端25mmを切断除去して高さ150mmに成形し, 打込み側の1面を残しエポキシ樹脂塗料で被覆。材齢28日後に24時間水中養生を行ってから浸漬開始(10%NaCl溶液)。 (1)浸漬期間6か月後に, 供試体を割裂し, 割裂面に0.1mol/L硝酸銀溶液を噴霧して塩化物イオン浸透深さを測定。 (2)浸漬期間12か月後に, 電子線マイクロアナライザー(EPMA)による塩化物イオン濃度の面分析(分析領域40×40mm)を実施。	φ100× 150mm	各3体 (浸漬 6か月) 各3体 (浸漬 12か月)

※)反応性骨材を用いており, 若材齢の水分供給により膨張する可能性があるため水中養生は未実施。

耐久化を実現できることが明らかになっているものの²⁾, 本研究での BFS の置換率はワーカビリティやブリーディングに影響しないことが多く確認されている^{30～50%}とした。また, BFS と 6000 プレーンの高炉スラグ微粉末(以下, GGBS)の併用効果も検討し, GGBSの置換率は, PC 構造物に適用される場合の置換率として一般的な50%とした⁹⁾。

本検討に用いたコンクリートの配合を表－1 に示す。軌道スラブに用いるコンクリートの配合条件は, 設計基準強度 40N/mm², スランブ 6±1.5cm, 空気量 4.0±1.0 %, プレストレス導入時の圧縮強度 32N/mm² である。検討にはこれらの条件を満たすよう試験練りによって決定した 6 配合を用いた。基準となる早強セメント単味(以下, 早強単味)の W/B が 37%の配合(H37-0), 青函トンネル内や海岸付近の軌道スラブに採用されてきた海水の化学

的侵食や塩害による劣化に対する抵抗性を高めるために中庸熱ポルトランドセメントを使用した W/B が 28% の配合(M28-0)¹⁰⁾, H37-0 の細骨材の 30%または 50%を BFS で体積置換した配合(H37-30, H37-50), BFS 置換(30%または 50%置換)と GGBS 置換(結合材の 50%を質量置換)を併用した W/B が 34%の配合(B34-30, B34-50)である。W/B は, プレストレス導入強度 32N/mm² を材齢 18 時間で満足できるよう決定した。ただし, M28-0 の初期強度発現は他と比較すると明らかに遅延するので, 後述するように蒸気養生時間を延長するとともに材齢 22 時間で所定の強度を満足できる配合とした。

2.2 検討項目および試験方法

検討項目および試験方法を表－2 に示す。検討項目は, 材料分離抵抗性, 圧縮強度, 中性化抵抗性, 凍結融解抵抗性, ASR 抑制効果, 塩化物イオン浸透抵抗性とした。

蒸気養生方法を表-3 に示す。蒸気養生は実際の軌道スラブの製作工程に基づいて決定した。ただし、M28-0 においては前置き時間と最高温度維持期間を延長させた。また、一般的な製作工程と同様に蒸気養生終了後に3日の水中養生を行った。

ASR 抑制効果の検討には表-1 の配合から粗骨材の50%を反応性骨材(安山岩)で体積置換した配合を用い、苛性ソーダ(水酸化ナトリウム)をコンクリートのアルカリ量が Na_2O 当量で $5.5\text{kg}/\text{m}^3$ となるように外割りで添加した。なお、材料のアルカリ量はセメント由来分のみ考慮した。また、反応性骨材を用いたことから若材齢時の水分供給による膨張が試験結果に影響を及ぼさないように蒸気養生後の水中養生は行っていない。

3. 試験結果および考察

3.1 材料分離抵抗性

フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性をスランブ試験後に平板を叩き試料の直径が 550mm になるまで変形させて確認した。その結果、写真-2 に示した一例のように、BFS を用いた全ての配合において、直径 550mm 時でも浮き水の発生やペーストと骨材の分離等はみられなかった。よって、軌道スラブへの適用を想定した配合において、BFS 置換率 50%までは材料分離抵抗性に問題はないことを確認できた。

3.2 圧縮強度

BFS 置換率が圧縮強度におよぼす影響を図-1 に示す。図-1 に示すように、全ての配合において、プレストレス導入強度 ($32\text{N}/\text{mm}^2$) を材齢 1 日で満足するとともに、材齢 28 日の圧縮強度は設計基準強度 ($40\text{N}/\text{mm}^2$) 以上となった。また、結合材が早強単味の配合 (H37) と GGBS を 50%置換した配合 (B34) いずれにおいても BFS の置換率が圧縮強度におよぼす影響はほとんど認められなかった。なお、材齢 1 日の圧縮強度が同等となるように全ての配合の W/B を決定しており、材齢 28 日以降の B34 の圧縮強度は H37 と比較すると増進し、最も W/B が小さい M28 の圧縮強度は他と比べると明らかに大きかった。

3.3 中性化抵抗性

促進中性化試験による中性化深さ(各3体平均)の推移を図-2 に示す。促進期間 26 週においても BFS のみ置換した配合 (H37-30, H37-50) は中性化が全く進行しておらず、非常に高い中性化抵抗性を有していることがわかる。また、一般的に GGBS を置換すると中性化は大きくなる傾向があるものの、PC 構造物に用いるような高強度コンクリートにおいては組織が緻密であるため GGBS を 50%置換しても中性化に対して問題ないことが

表-3 蒸気養生方法

工程	標準 (M28-0以外)	中庸熱 (M28-0)
前置き	3時間	7時間
昇温	15℃/時間	15℃/時間
最高温度維持	45℃ - 4時間	45℃ - 8時間
降温	15℃以下/時間	15℃以下/時間
降温後保持※	30℃ - 材齢16時間まで	30℃ - 材齢20時間まで

※)製品製作時にはコンクリートの水和熱により養生シート内の温度は30℃以上で保持されていることを考慮



写真-2 材料分離抵抗性の確認 (H37-50)

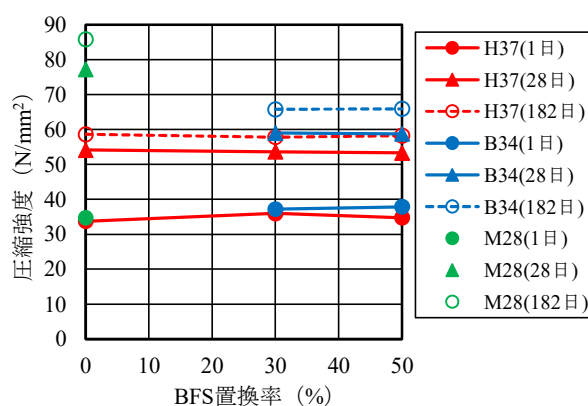


図-1 BFS 置換率と圧縮強度の関係

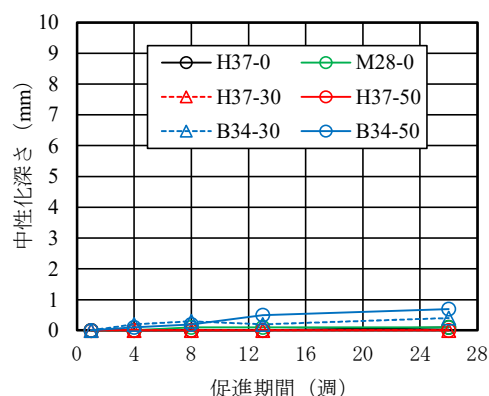


図-2 中性化深さの推移

知られている⁹⁾。本研究においても GGBS を併用した配合 (B34-30, B34-50) は促進期間 13 週から若干中性化がみられるものの、促進期間 26 週でも中性化深さは 1mm 程度と小さかった。

3.4 凍結融解抵抗性

凍結融解試験における各配合 3 体平均の相対動弾性係数の推移を図-3 に、試験終了後の供試体状況の一例を図-4 に示す。

図-3 から全ての供試体において 300 サイクル時でも相対動弾性係数はほとんど低下していないことがわかる。また、図-4 の一例のように 300 サイクル終了後の全ての供試体の表層部の損傷は軽微なものであった。BFS を 100%置換した AE 剤を用いない W/B=35%の早強単味の配合において今回と同様に JIS に準じた試験を行った場合、蒸気養生の有無によらず 300 サイクル到達前に相対動弾性係数が明確に低下することが報告されている⁵⁾。本研究では、AE 剤を用いて空気量を 4%程度として蒸気養生後の水中養生を 3 日行くと、早強単味の場合でも BFS の置換率 50%までは高い凍結融解抵抗性を有していることを確認できた。

3.5 ASR 抑制効果

ASR 試験における各配合 3 体平均の膨張率と質量変化率の推移を図-5 と図-6 に示す。図-5 に示すように、反応性骨材を用いているため H37-0 は試験開始時から顕著な膨張挙動を示した。H37-0 と比較すると、BFS を用いた H37-30 と H37-50 は、BFS 置換率が増えるほど膨張率は小さくなった。さらに、GGBS を併用すると明らかに膨張率が減少した。なお、H37-0 は 5 か月の測定材齢で、M28-0, H37-30, H37-50 の 3 体においては 6 か月の測定材齢でひび割れが発生し、GGBS を併用した B34-30 と B34-50 は試験終了時までひび割れは発生しなかった。

図-6 の質量変化率は、膨張率が大きい供試体ほど質量が増加する傾向がみられた。GGBS を用いると ASR ゲル生成が抑制され、それにより ASR による膨張も抑制されることが確認されている¹¹⁾。質量変化率の増加は主に水を含んだ膨潤性の ASR ゲル生成に起因していると考えられることから、本研究のように蒸気養生を行った場合にも BFS や GGBS の使用により ASR ゲル生成が抑制されると推測される。

このように、BFS そのものも ASR を起こさない安定した骨材であり¹⁾、BFS 置換により細骨材に起因した ASR による劣化リスクを低減できるとともに、反応性を有する粗骨材の ASR による膨張も抑制できることがわかった。既往の検討⁹⁾で指摘されているように蒸気養生によって BFS 使用による ASR 抑制効果は小さくなっている可能性はあるものの、本研究における材齢 12 か月の ASR の膨張抑制率は H37-0 と H37-50 とを比較すると

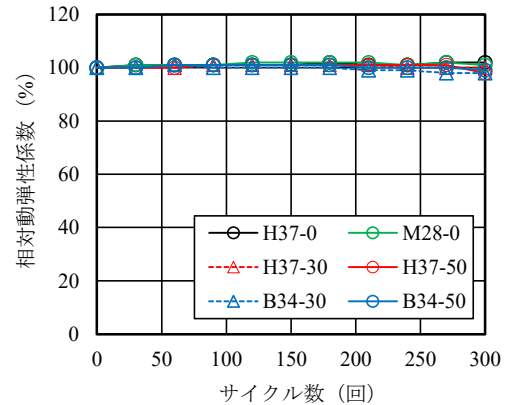


図-3 相対動弾性係数の推移

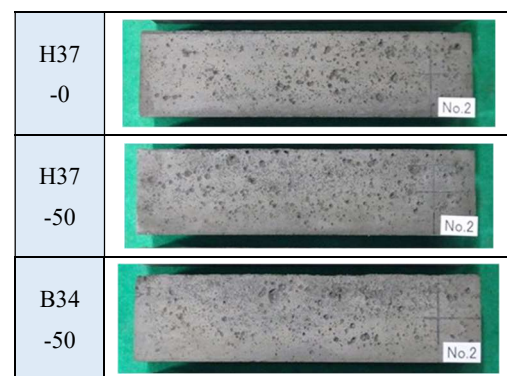


図-4 凍結融解試験後の供試体（側面）

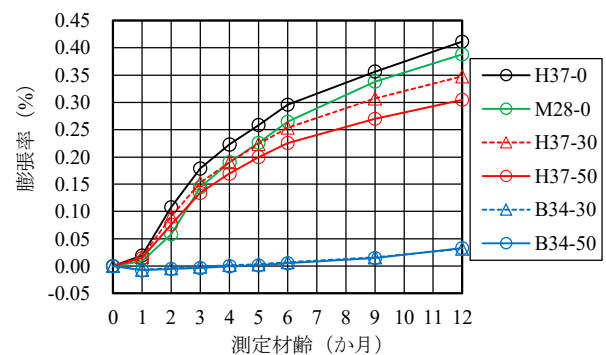


図-5 膨張率の推移

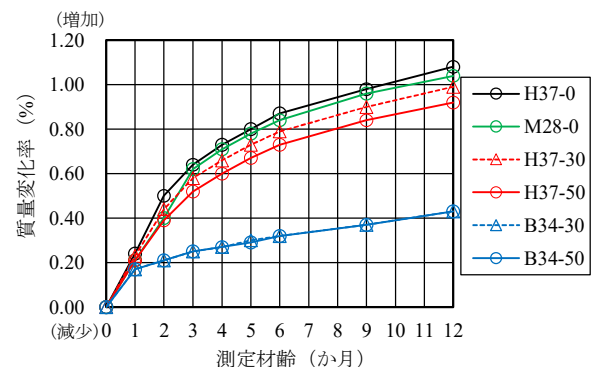


図-6 質量変化率の推移

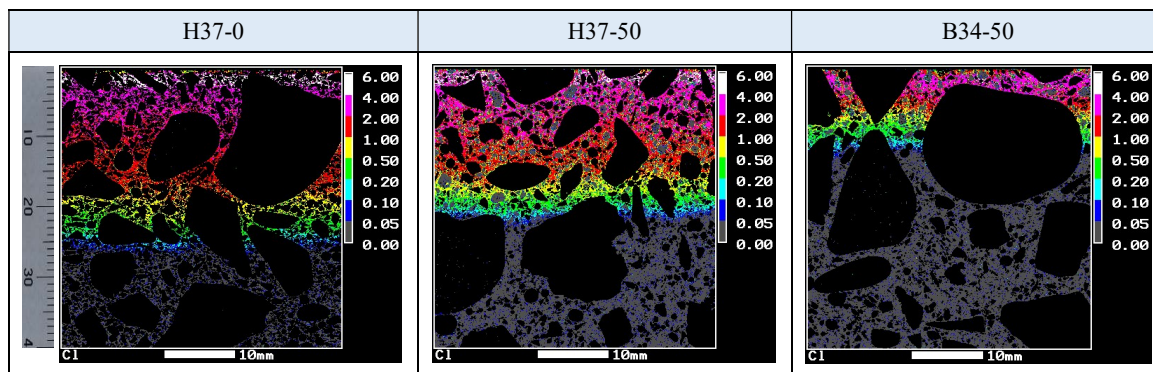


図-7 塩化物イオン濃度の面分析画像

※上面が塩水作用面

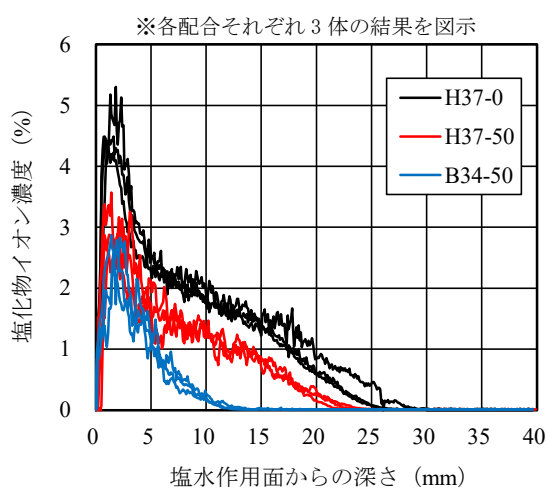


図-8 EPMAによる塩化物イオン濃度分布曲線

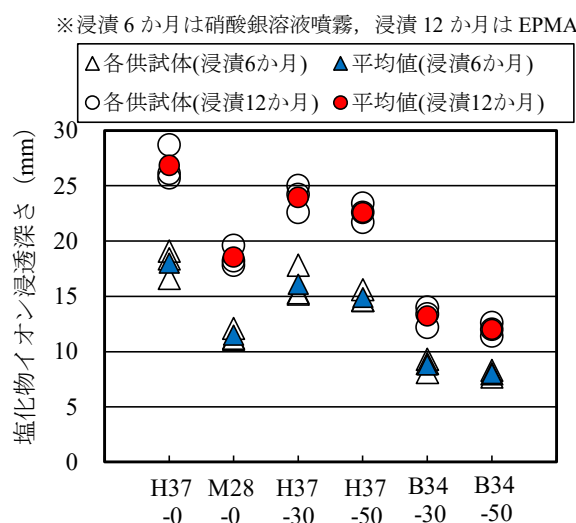


図-9 塩化物イオン浸透深さ

26%であった。

3.6 塩化物イオン浸透抵抗性

10%NaCl 溶液に 12 か月間浸漬した供試体の EPMA 面分析画像 (分析領域: 縦 40 mm×横 40 mm) と深さ 0.1mm (1 ピクセル分) ごとの塩化物イオン濃度分布曲線 (骨材を除いた部分の横方向のピクセル群の平均値) の一例を図-7 と図-8 に示す。さらに, EPMA 分析から得られた塩化物イオン浸透深さ (骨材を除いた部分の横方向の全ピクセルの平均深さ) と見掛けの拡散係数の測定結果を図-9 と図-10 に示す。図-9 には浸漬期間 6 か月時点で硝酸銀溶液を噴霧して測定した塩化物イオン浸透深さの結果も併せて示す。見掛けの拡散係数は, JSCE-G572 に準拠し, 骨材のピクセルを除いた場合の塩化物イオン濃度分布曲線より, Fick の第 2 法則に基づいた拡散方程式を用いて求めた。また, 表-4 には H37-0 に対する浸透深さと見掛けの拡散係数の比を示している。

図-9 に示すように, H37-0 を基準とすると H37-30 と H37-50 の浸漬 12 か月の塩化物イオン浸透深さは, BFS 置換率が増えるほど小さくなった。さらに, 図-8 の H37-0 と H37-50 の塩化物イオン濃度分布曲線の比較から全ての深さにおける塩化物イオン濃度は BFS 置換により

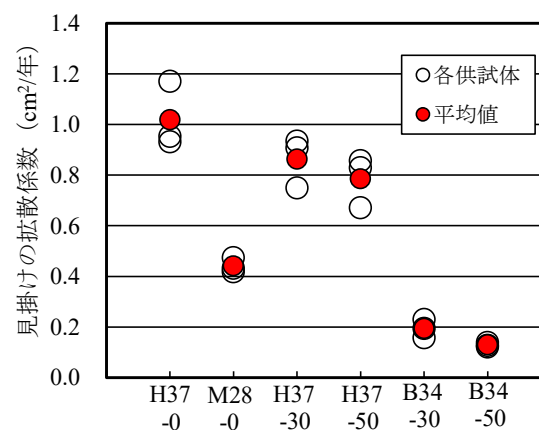


図-10 EPMAによる見掛けの拡散係数

減少することがわかる。GGBS を併用すると, 図-7～図-9 に示すように塩化物イオン浸透抵抗性は顕著に向上し, B34-50 の H37-0 に対する塩化物イオン浸透深さの比は 0.44 であった (表-4)。また, 図-9 の浸漬 6 か月時点の浸透深さについて, EPMA 分析から得られる塩化物イオン浸透深さと比較して硝酸銀溶液噴霧による浸透深さは小さくなることが報告されているため¹²⁾, 浸漬 12 か月と比べると浸透深さは過小評価されていると推測され

るものの、表-4 に示すように H37-0 に対する比は全ての配合で浸漬 12 か月と同程度であった。

図-10 に示す塩化物イオンの見掛けの拡散係数も浸透深さと同様の傾向であり、H37-0 と比較すると BFS 置換率が増えるほど減少し、GGBS 併用によってその減少は顕著になり、B34-50 の H37-0 に対する比は 0.13 まで低下した（表-4）。

以上のように、BFS を用いることによって軌道スラブの塩化物イオン浸透抵抗性が向上することを確認できた。さらに、GGBS を併用した場合、塩害対策の軌道スラブに適用されてきた M28-0 と比較しても塩化物イオン浸透深さと見掛けの拡散係数は小さくなっており、非常に高い塩化物イオン浸透抵抗性を有しているといえる。

4. まとめ

BFS を用いたコンクリートの軌道スラブへの適用性を実際の製作工程を模擬した供試体を製作して耐久性の観点から検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) BFS を用いたコンクリートをスランプ試験後に直径が 550mm になるまで変形させても浮き水の発生やペーストと骨材の分離等はみられず、材料分離抵抗性に問題はなかった。
- (2) 結合材が早強単味の配合と GGBS を 50%置換した配合いずれにおいても BFS の置換率が圧縮強度におよぼす影響はほとんど認められなかった。
- (3) BFS や GGBS を用いた場合も高い中性化抵抗性や凍結融解抵抗性を有していた。
- (4) 天然細骨材のみを用いた場合と比較して、BFS を 50%置換すると 26%の ASR 抑制効果がみられた。さらに、GGBS を併用すると ASR による膨張は明らかに抑制された。
- (5) BFS の置換率が増えるほど塩化物イオンの浸透深さおよび見掛けの拡散係数は小さくなり、GGBS の併用によりそれらの減少はさらに顕著となった。

天然細骨材の一部を BFS で置換した軌道スラブの耐久性は従来と同等以上となることが確認できたため、今後、クリープ・収縮等の設計値を検討するとともに、試験施工を通して実施工における留意点を確認する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：高炉スラグ細骨材を用いたプレキャストコンクリート製品の設計・製造・施工指針（案）、コンクリートライブラリー155, 2019.3
- 2) 土木学会：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する研究小委員会成果報告書, 2018.7
- 3) 綾野克紀, 二井谷教治, 細谷多慶, 高橋克則：高炉

表-4 塩化物イオン浸透抵抗性の H37-0 に対する比

配合名	H37-0に対する比		
	浸透深さ		見掛けの拡散係数
	浸漬6か月 (硝酸銀噴霧)	浸漬12か月 (EPMA)	浸漬12か月 (EPMA)
H37-0	1.00	1.00	1.00
M28-0	0.69	0.64	0.43
H37-30	0.89	0.89	0.85
H37-50	0.84	0.83	0.77
B34-30	0.49	0.49	0.19
B34-50	0.45	0.44	0.13

スラグ細骨材を用いたプレキャスト部材の研究開発, プレストレストコンクリート, Vol.59, No.6, pp.80-85, 2017.11

- 4) 綾野克紀, 藤井隆史：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.70, No.4, pp.417-427, 2014.12
- 5) 田中湧馬, 藤井隆史, 綾野克紀：結合材の種類が高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの性能に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.65-70, 2020.7
- 6) TRUONG NGOC TAM, 藤井隆史, 綾野克紀：高炉スラグ細骨材のアルカリシリカ反応抑制効果に関する研究, 第 70 回土木学会中国支部研究発表会講演概要集, V-27, pp.505-506, 2018.5
- 7) 土木学会：高炉スラグ骨材コンクリート施工指針, コンクリートライブラリー76, 1993.7
- 8) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 吉澤千秋：高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.139-144, 2009.7
- 9) (国研) 土木研究所, (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(Ⅱ), 共同研究報告書第 472 号, 2016.1.
- 10) 園田強介, 新田哲郎, 古賀裕樹, 桑原守：北陸新幹線 上越・富山軌道スラブの製作と運搬, 橋梁と基礎, pp.97-100, 2018.8
- 11) 川端雄一郎, 羽瀧貴士, 忽那惇, 与那嶺一秀：海水練りコンクリートの ASR 膨張に対する高炉スラグ微粉末の抑制効果, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, pp.323-330, 2018.3
- 12) 中村英佑, 皆川浩, 宮本慎太郎, 久田真, 古賀裕久, 渡辺博志：通電後の塩化物イオン浸透深さを用いたコンクリートの遮塩性能の評価, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.3, pp.304-322, 2016.9